OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	光に応答する超伝導材料
Author(s)	鷹岡, 貞夫
Citation	大阪大学低温センターだより. 1991, 76, p. 6-10
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/12517
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

光に応答する超伝導材料

理学部　　鷹　岡　貞　夫（豊中4161）

超伝導体に光を照射すると一般的にはほとんど影響しないが、しいて言うと入射光がクーパー．ペアを壊したり、超伝導体の温度を上昇させるため超伝導転移温度（T_c）を下げる傾向にある。しかし、超伝導体と半導体の複合体では、半導体中のキャリアが光照射により大きく影響を受けるため、新しい効果が期待される。我々は、不純物Inをドープした半導体$Pb_{1-x}Sn_xTe$と超伝導金属Pbの複合体が光を照射することにより、T_cが上昇することを見出し、この現象を以下で述べるように超伝導体－半導体間での超伝導近接効果により説明した。

Ⅳ—Ⅵ属半導体$Pb_{1-x}Sn_xTe$はバンドギャップが狭く、静的誘電率が大きいので、比較的高いキャリア濃度をもつにもかかわらず、高キャリア易動度を示す縮退半導体であることが知られている。さらにこの半導体にInを約１％ドープするとフェルミ準位（化学ポテンシャル）がピン止めされ、その位置はSnの組成（x）を増加させるにつれて伝導帯からバンドキャップ中へ、さらに価電子帯へと変化する。特にフェルミ準位がバンドギャップ内にあるとき図１(a)に示すように約25Kの低温から、大きな“永久光伝導”を示し光励起されたキャリアは光源を切った後も無くならない。これらの現象はアンダーソンの負の相関エネルギーのモデルで説明されている。このモデルでは、Inの不純物は周りの格子と強く結合していて、その結合よる格子緩

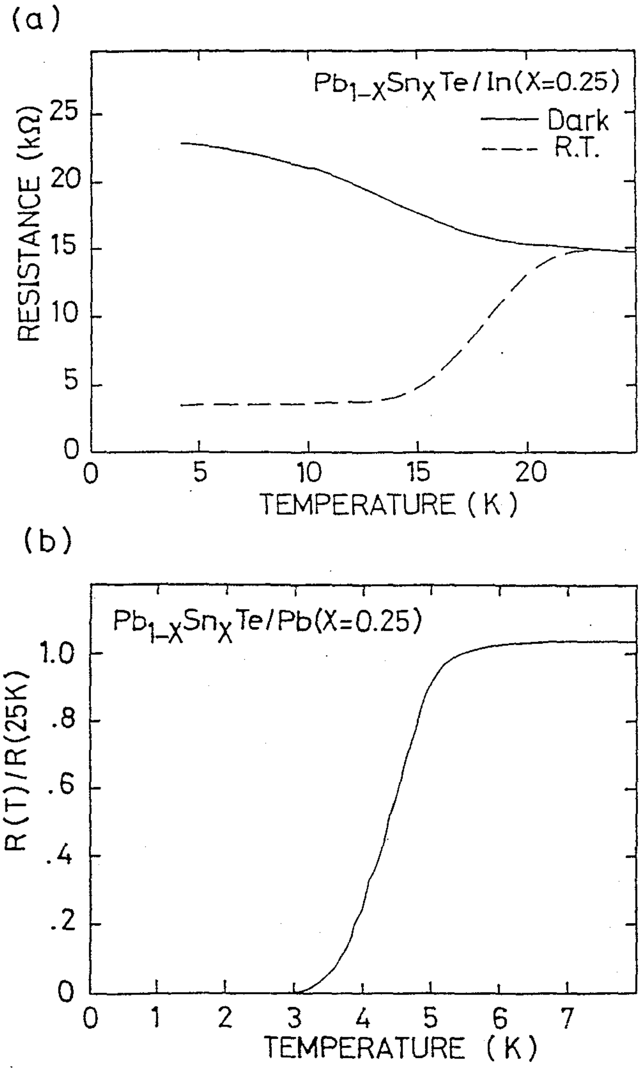

図１．(a)Ｉｎを約１％ドープした$Pb_{1-x}Sn_xTe$（$x=0.25$）フィルムの電気抵抗の温度変化。25K以下で室温からの放射による光伝導が観測されている。
(b)約１％Ｐｂの析出を含む$Pb_{1-x}Sn_xTe$（$x=0.25$）フィルムの電気抵抗の温度変化。６K付近で超伝導転移を示している。

和のため2個電子を捉えているIn不純物のエネルギー準位のほうが、電子を1個捉えているエネルギー準位より低くなっているため、フェルミ準位がその不純物準位によりピン止めされる。光励起された電子が元の不純物準位の緩和する間に、格子緩和によるエネルギー障壁があるため、低温では励起されたキャリアは長時間緩和しないと説明されている。[1]

一方、我々は僅か1％しかPbの析出を含まないPbTe－SnTe超格子や$Pb_{1-x}Sn_xTe$フィルムが図1(b)に示したようにバルクのPbのT_c(7.2K）のすぐ低温側で超伝導になることを見い出した。[2),3] T_c以上の温度ではこれらの電気伝導やホール係数は母体の半導体の振舞いを示すので、この超伝導電流は析出したPbが直接的につながって流れるのではなく、析出したPb粒子の超伝導状態が近接効果により半導体中へ侵入してPb粒子が互いにジョセフソン結合して流れると予測される。近接効果の理論によると超伝導状態の半導体中への侵入距離はその半導体の易動度やキャリア濃度に比例して長くなるが、この半導体は単結晶では比較的高いキャリア濃度でかつ高易動度なので、侵入距離が長くなり、～1 μmにも達すると予測される。それゆえ僅かなPb粒子の含有量（1％）にもかかわらず超伝導になるという特異な性質を示すと考えられている。また一般的にはこのような小さいジョセフソン結合の集合体では、ジョセフソン結合エネルギーより静電容量エネルギーの方が大きくなり超伝導にならないとされているが、この半導体では誘電率が大きいので静電容量エネルギーが小さくなり超伝導になるのに有利である。

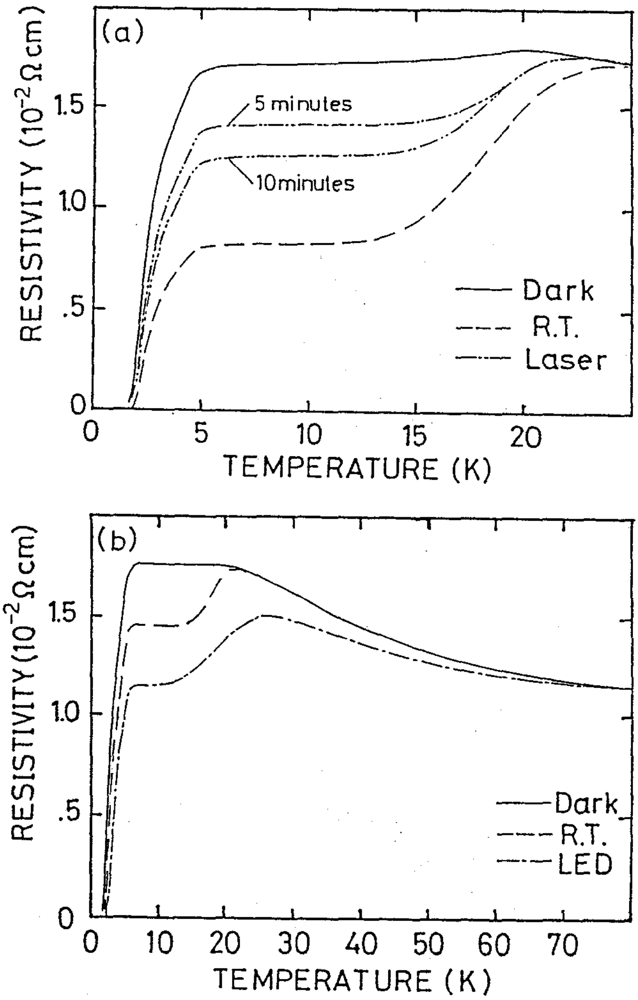

図2．様々な光を照射したときのPbの析出を含みInをドープした$Pb_{1-x}Sn_xTe$（$x=0.25$）フィルムの電気抵抗の(a)試料A (b)試料Bについての温度変化。
R.T.：室温からの放射光、Dark：光を照射していない、LED：GaAsのフォトダイオードからの放射光、Laser：$Pb_{1-x}Sn_xTe$半導体レーザーからの放射光。図(a)中の時間はレーザー光の照射時間を示す。

これらのことを組み合わせると、Pb粒子の析出を含むInをドープした$Pb_{1-x}Sn_xTe$では光伝導と超伝導の両方の性質を示すことが期待される。さらにこのような試料では光励起されたキャリア濃度の変化で近接効果

による超伝導状態の侵入距離が大きく変化するため、超伝導電流が光を照射したとき流れ、照射しないとき流れなくなることが期待される。この現象を確認するため、光励起によるキャリア濃度の変化が特に大きい、フェルミ準位のピン止めの位置がギャップ中にあるInをドープした$Pb_{1-x}Sn_xTe$ (x=0.25)にPbを析出させたフィルムを作製し、光照射の光源の種類および量を変えてその超伝導特性の差異を測定した。[4~6)]

試料フィルムはIn、Pbを1 at.%余分に含んだ$Pb_{1-x}Sn_xTe$ (x=0.25) のソースをBaF_2(111)へき開面基板上に真空蒸着法で作製した。その際、ソース温度は650℃、基板温度は280℃、真空度は10^{-6}Torrで行い、フィルムの膜厚は1 μmであった。作製されたフィルムは多結晶で、電子顕微鏡では、その表面にPbの析出によると思われる100nm程度の粒界が観測された。この試料の低温領域での電気抵抗は、図2(a), (b)のように約20K以下で光照射下での光伝導効果と6K付近超伝導転移を示す。照射する光の光源として、室温からの放射(中心波長50 μm)、GaAsのフォト・ダイオード(波長1 μm) および$Pb_{1-x}Sn_xTe$半導体レーザー(波長13 μm) の3種類を用いた。室温からの放射は試料の近くのシャッターによりオン・オフ出来るようにして行い、また半導体レーザーの照射は、それによる加熱を避けるため抵抗の温度変化の測定中は切って行った。

図2(a), (b)はいろいろな光を照射したとき、および照射しなときの試料の電気抵抗の温度変化である。光照射により低温で照射しないときより抵抗が小さくなっている。レーザー光および室温からの放射による光伝導は約25K以下でしか観測されていないが、フォト・ダイオードによる光伝導ではその一部分は80K付近まで観測され、その照射を切った後の緩和時間は前者の場合と比べて速い。そのような高温域における光伝導はバルクの単結晶では観測されていないので何か違う機構によるものと思われる。光照射による超伝導転移への影響を見やすくするために、T_cより僅かに高い温度での抵抗値で規格化した各々の抵抗の温度変化を図3に示してある。T_cを規格化した抵抗の半分になる温度で定義すると、T_cは室温からの放射により0.2K、フォト・ダイオードからの照射により0.7K上昇している。

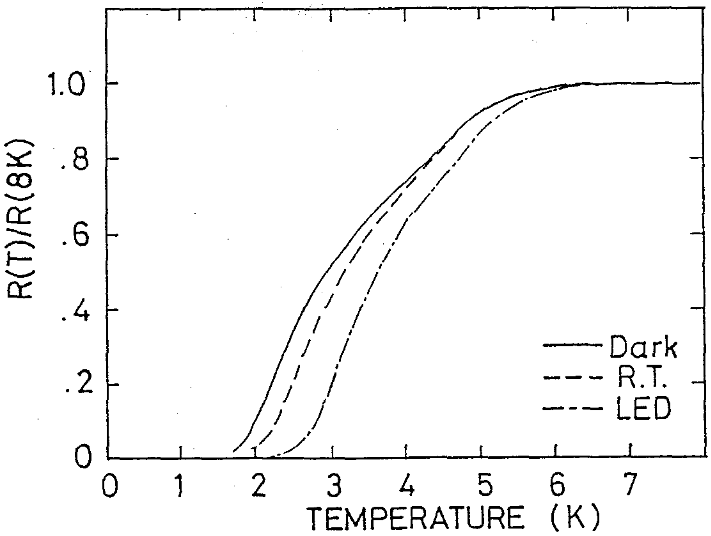

図3. 様々な光を照射したとき、試料BについてT_c直上の8Kの抵抗値で規格化した抵抗の温度変化。

この超伝導は、Pbの析出が１％と少ないこと、T_c以上ではホール測定より$10^{18}cm^{-3}$程度のキャリア濃度の縮退半導体の性質を示すので、図４(a)に図式的に示したように析出したPbが直接的につながって流れるのではなく、析出したPb粒子の超伝導状態が近接効果により半導体中へ侵入してPb粒子が互いにジョセフソン結合しておこると推測されている。この超伝導状態の半導体中への侵入距離（ξ_n）近接効果の理論によると

$$\xi_n = (\hbar^3 \mu / 6\pi m^* e k_B T)^{1/2} (3\pi^2 n)^{1/3}, \qquad \xi_n >> l_e \tag{1}$$

と表せる。ここでμ、n、m^*はそれぞれキャリアの易動度、密度、有効質量である。

一般的に$Pb_{1-x}Sn_xTe$は易動度が大きく、有効質量が小さいためにξ_nが長くなるので、光励起キャリア濃度による変化より大きくξ_nを変えることが可能である。ホール係数より求めたキャリア濃度は低温で光を照射することによりキャリア濃度が照射しない場合に比べて約50％増加する。そのため式(1)よりξ_nが増加し図４(b)に模式的に示したように$Pb_{1-x}Sn_xTe$中の超伝導状態の部分が増加し、より容易に超伝導電流が流れやすくなり、その結果T_cが増加すると思われる。表１に測定したフィルムの平均自由行程（l_e）およびξ_n、T_c、ΔT_cなどの超伝導特性を示してある。T_cの増加（ΔT_c）がξ_nの増加に関係しているようにみえる。この実験で用いた試料の$Pb_{1-x}Sn_x$Te／Inのフィルムは多結晶なので光励起キャリア濃度の増加の割合やその易動度は比較的小さいが、単結晶の試料を用いるとより長く、また広い範囲にわたってξ_nを変えることが可能であり、より明確に超伝導に対する光照射の効果が観測されることが期待される。

なお本研究は大阪大学理学部の邑瀬和生教授、小新堂 透氏（現在、和光純薬工業）と共同で行われたものである。

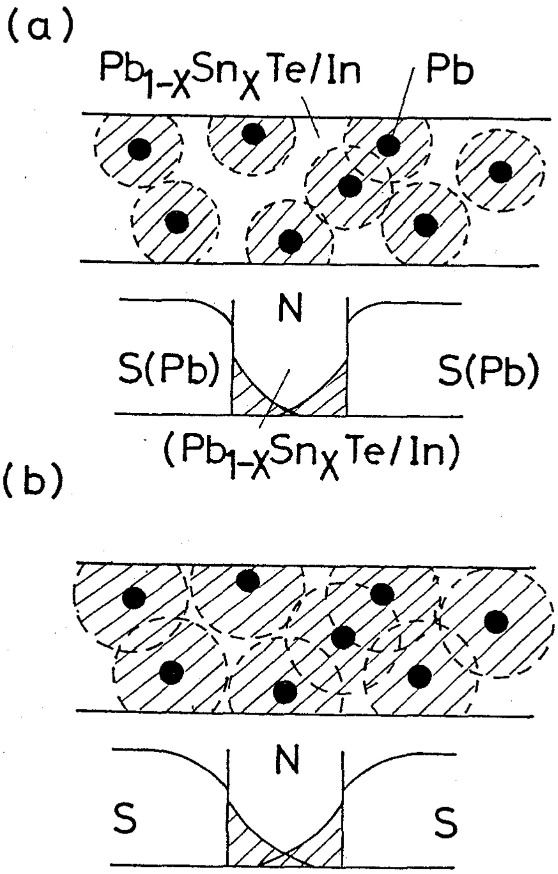

図４．Pbの析出を含みInをドープした$Pb_{1-x}Sn_xTe$の模式的な図。
(a)光を照射しないとき　(b)光を照射したとき。
$Pb_{1-x}Sn_xTe$／Inへ染みだしたPbの超伝導領域を斜線の部分で表している。光を照射した(b)の場合のほうが超伝導領域が広がっている。

表1．測定した$Pb_{1-x}Sn_xTe$／In、Pbフィルムの主な超伝導特性。侵入距離(ξ_n)、平均自由行程(l_c)は$T=6$ Kとして計算した。T_cは常伝導抵抗が半分になる温度で定義した。ΔT_c：DarkのT_cからの増加分。

Sample		ξ_n(nm)	l_c(nm)	T_c(k)	ΔT_c(k)
	Dark	19.4	8.82	2.49	—
A	R.T.	27.6	17.4	2.66	0.17
	LED	28.4	17.0	3.01	0.52
	Dark	16.4	4.58	2.94	—
B	R.T.	17.8	5.25	3.19	0.25
	LED	19.2	5.48	3.61	0.67

参考文献

1）Investigation of Transport Properties in $Pb_{1-x}Sn_xTe$ Doped with Indium; S. Takaoka, T. Itoga and K. Murase, Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) 216.

2）Superconducting Behavior of PbTe-SnTe Superlattices; K. Murase, S. Ishida, S. Takaoka, T. Okumura, H. Fujiyasu, A. Ishida and M. Aoki; Surface Science **170** (1986) 486.

3）Superconducting of (Pb,Sn,Ge)Te Semiconductor Film with a Little Pb Inclusion; S. Takaoka, T. Sugita and K. Murase, Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) 1345.

4）Enhancement of Superconducting Transition Temperature by Photo-cariers in Indium Doped $Pb_{1-x}Sn_xTe$ Film with Lead Inclusion; T. Koshindo, S. Takaoka and K. Murase, Solid State Commun. **76** (1990) 31.

5）Controllability of Superconducting Behavior by Photoilluminations in Indium Doped $Pb_{1-x}Sn_xTe$ with Lead Inclusion; S. Takaoka, T. Koshindo and K. Murase, *Proc. 20th Int. Conf. Phys. Semiconductors*, Thessaloniki, Greece, 1990 (edited by E. M.Anastassakis and J. D. Joannopoulos, World Scientific, Singapore, 1990) p.2275.

6）〔半導体－超伝導体接合での超伝導近接効果に対する光伝導の影響〕小新堂　透、物性研究**56－5** (1991－8) p.566.